

# **Instituto Tecnológico de Costa Rica**

## **Escuela de Ingeniería Forestal**

Proyecto de graduación: grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal

Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una plantación de *Gmelina arborea* Roxb. Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.

Yeison Cortés Vega

Cartago, Costa Rica

2016



# CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por PhD. Julio Calvo Alvarado, Lic. Ana Julieta Calvo Obando, Lic. Dorian Carvajal Venegas, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

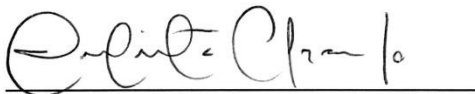


Julio Calvo Alvarado, PhD.

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Director de tesis



Ana Julieta Calvo Obando, Lic.

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Lector



Dorian Carvajal Venegas, Lic.

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Lector

# Dedicatoria

Este trabajo se lo dedico a Dios y a mi familia, en especial a mis madres Jenny Vega Hernandez y Urania Hernandez Alvarado y a mi tía Eillen Vega Hernandez, por enseñarme a luchar por lo que se quiere, por que nunca me dejaron caer en los momentos difíciles, por ensañarme los valores necesarios para ser una persona de bien.

# Agradecimientos

Este estudio se realizó dentro del marco del proyecto de investigación **“Irazú: primeros pasos para desarrollar en Costa Rica capacidades y calidades científicas y tecnológicas para la ejecución de proyectos aeroespaciales”**, proyecto financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se agradece a la empresa Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A. por facilitarnos el sitio experimental y la plantación forestal para llevar a cabo este proyecto. Y especialmente el apoyo logístico del Ing. Michael Garro Chavarría.

Al PhD. Julio Calvo Alvarado por brindarme la oportunidad de desarrollar mi tesis de graduación en un proyecto tan importante como este, además de guiarme como tutor de tesis.

A la Lic. Ana Julieta Calvo Obando por toda su cooperación durante el proceso de elaboración del proyecto de graduación, además de su colaboración como lectora del mismo.

Al Lic. Dorian Carvajal Venegas por su colaboración y observaciones como lector del proyecto.

A toda mi familia en especial a mis madres Jenny Vega Hernandez y Urania Hernandez Alvarado y a mi tía Eillen Vega Hernandez por brindarme todo su apoyo durante este largo camino.

A mi tío Wilberth Vega Hernandez y su esposa Lili Irola, por abrirme las puertas de su casa y tratarme como un hijo durante todos los años de estudio.

A María José Cervantes Calderón, Oscar Godínez Serracín y demás amigos por el apoyo y colaboración durante este proceso.



## Índice de contenido

Constancia de defensa pública de proyecto de graduación .....	2
Dedicatoria .....	3
Agradecimientos .....	4
Tesis de Licenciatura .....	1
Resumen .....	2
Abstract .....	3
Introducción .....	4
Material y métodos .....	6
Sitio de estudio .....	6
Cuantificación de biomasa, carbono, CO <sub>2</sub> equivalente .....	11
Biomasa (Mg ha <sup>-1</sup> ). .....	12
Carbono (Mg ha <sup>-1</sup> ). .....	13
CO <sub>2</sub> equivalente (Mg ha <sup>-1</sup> ). .....	13
Tasas de incremento mensual de biomasa y relación precipitación y biomasa .....	13
Resultados .....	14
Variables climáticas y crecimiento .....	14
Biomasa, carbono, CO <sub>2</sub> equivalente .....	17
Tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa .....	20
Discusión .....	21
Crecimiento .....	21
Biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> -e .....	22
Tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa .....	24
Conclusiones .....	25
Recomendaciones .....	26
Referencias .....	26

## Índice de figuras

Figura 1. Ubicación del lote de estudio en la finca San Clemente, Los Chiles, Costa Rica.	7
Figura 2. Suelos de orden Ultisol y suborden Udults característicos en la plantación en estudio.	8
Figura 3. Diseño de muestreo en el lote de estudio.	9
Figura 4. Medición en campo de la variable altura total.	10
Figura 5. Estación climática instalada en el lote de estudio.	10
Figura 6. Climograma mensual durante el periodo de estudio, los Chiles, Costa Rica.	15
Figura 7. Diámetro y altura promedio para cada medición.	16
Figura 8. Intervalos de confianza y valores promedio del DAP y la altura total.	17
Figura 9. Valores acumulados de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> -e en cada medición mensual.	18
Figura 10. Distribución del total de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> -e por componentes del árbol.	19
Figura 11. Relación entre la precipitación mensual acumulada y el crecimiento mensual de la biomasa.	21

## Índice de cuadros

Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la biomasa arriba del suelo en función del DAP (cm). .....	12
Cuadro 2. Tasas porcentuales de incremento mensual e incrementos mensuales del DAP y la altura total. ....	16
Cuadro 3. Distribución del número de árboles por clases diamétricas (cm). ....	17
Cuadro 4. Biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> -e (Mg ha <sup>-1</sup> ) acumulado en una plantación de <i>G.arborea</i> de un año y tres meses de edad. ....	19
Cuadro 5. Tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa total.....	20

## **Tesis de Licenciatura**

Análisis mensual de acumulación de biomasa y fijación de carbono en una  
plantación de *Gmelina arborea* Roxb. Los Chiles, Alajuela, Costa Rica.



## Resumen

Se estudió el crecimiento en periodos cortos del DAP, la altura total, el incremento y la acumulación de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e en una plantación de *G. arborea* de un año y tres meses de edad, durante un periodo de ocho meses, en el cantón de los Chiles, Costa Rica. Se establecieron tres parcelas de 500 m<sup>2</sup> (20 x 25 m), se midió el DAP y la altura total mensualmente durante 8 meses (marzo-octubre). Se utilizaron modelos alométricos en función del DAP (reportados en la literatura) para la cuantificación de biomasa, para la cuantificación del carbono fijado y CO<sub>2</sub>-e. El cálculo de las tasas de incremento mensual se realizó con la fórmula de la FAO (1995). Los resultados del estudio mostraron un promedio de DAP y altura total iguales a 9,86 cm y 7,03 m, con tasas de incremento mensual de 14,81 % y 11,34% respectivamente, durante el periodo de estudio se presentó un incremento de biomasa de 22,71 Mg ha<sup>-1</sup>, con una tasa de incremento mensual del 35,62%. Al finalizar el estudio los valores acumulados de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e fueron 25,94, 12,97 y 47,59 Mg ha<sup>-1</sup> y presentaron la siguiente distribución por componentes del árbol: fuste 61%, raíces 17%, ramas 14% y follaje 8%. Este estudio comprobó que las plantaciones de rápido crecimiento son una importante opción para la compensación de CO<sub>2</sub> mediante la fijación de carbono en la biomasa de los árboles (venta de bonos de carbono).

**Palabras clave:** Biomasa forestal, fijación de carbono, *Gmelina arborea*, crecimiento de árboles.

## Abstract

The increase of the DBH and the total tree height, as well as the increase and accumulation of biomass, carbon and CO<sub>2</sub>-e were studied in a *G. arborea* plantation (1.3 years), during a eight month period in Los Chiles, Costa Rica. Three plots of 500 m<sup>2</sup> (20 x 25 m) were established, the total tree height and the DBH were measured during 8 months (from march to october 2016). Allometric equations based on the DBH (reported in the literature) were used for the biomass quantification, as well as for the fixed carbon and CO<sub>2</sub>-e quantification. The calculation of the monthly growth rates was made by using the FAO equations (1995). The results of this study showed an average DBH and total tree height of 9,86 cm and 7,03 m, with monthly growth rates of 14,81% y 11,34%, respectively; during the period of study, the biomass increased 22,71 Mg ha<sup>-1</sup>, with a monthly growth rate of 35,62%. At the end of this study the accumulated values of biomass, carbon and CO<sub>2</sub>-e were 25,94, 12,97 y 47,59 Mg ha<sup>-1</sup> with the following distribution for each one of the tree components: stem 61%, roots 17%, branches 14% and foliage 8%. This study support the conclusion, that fast growing tree plantations are an important option for the CO<sub>2</sub> compensation.

**Keywords:** Forest biomass, carbon fixation, *Gmelina arborea*, tree growth.

# Introducción

Los gases de efecto invernadero (GEI) son aquellos compuestos químicos en estado gaseoso presentes en la atmósfera y de origen natural o antropogénico, los principales GEI son: Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y el Hexafluoruro de azufre ( $\text{SF}_6$ ). Estos gases ocasionan que la radiación infrarroja se detenga en la atmósfera y como consecuencia se produzca un calentamiento de la superficie de la Tierra y la parte baja de la atmósfera. Se ha establecido que el  $\text{CO}_2$  es el gas de origen antropogénico más determinante para este calentamiento y que su concentración atmosférica ha incrementado. Esas consecuencias pueden generar fenómenos como: aumento del nivel del mar, catástrofes climatológicas y derretimiento de glaciares (Echeverri, 2006; IPCC, 2007). Ante tales consecuencias es importante tomar medidas que ayuden a disminuir la concentración de estos gases, especialmente del  $\text{CO}_2$ .

Los árboles son opciones de mitigación de los GEI, ya que son capaces de absorber el  $\text{CO}_2$  durante su crecimiento mediante el proceso de la fotosíntesis y fijar el carbono en la biomasa, la cual se define como la cantidad de materia seca (arriba y bajo el suelo) de un árbol, componente del árbol (ramas, fuste, hojas, raíces), población o bosque por encima y por debajo del suelo (Brown, 1997; Foley, Costa, Delire, Ramankutty y Snyder, 2003; Gayoso y Guerra, 2005). Asimismo, los bosques y las plantaciones forestales han incrementado su importancia como mitigadores del calentamiento global, ya que estos ecosistemas regulan el ciclo global del carbono. Particularmente, las plantaciones en el trópico presentan un acelerado crecimiento y una importante capacidad de fijación de carbono (IPCC, 2007; Salinas y Hernández, 2008; Bonan, 2008; Basu, 2009; Fonseca, Navarro, Alice y Rey-Benayas; 2012).

Según FAO (2015), en el mundo existe un total de 291 millones de hectáreas de plantaciones forestales, de las cuales 60 millones se encuentran en la zona tropical. Costa Rica posee 74627 hectáreas de plantación según el último mapa de tipos de bosque del país y las especies más utilizadas para reforestación son *Tectona grandis* L. f. y *Gmelina arborea* Roxb (SINAC, 2013; SIREFOR, 2013).

*G. arborea* es una especie originaria de Asia y fue introducida en Costa Rica en el año 1966 en la zona atlántica del país. Es una especie de rápido crecimiento, con un fuste cónico que

por lo general mide 50-80 cm de diámetro, en plantaciones su copa es densa y compacta, presenta un sistema radical profundo en suelos sin limitantes. Su desarrollo óptimo se da en zonas con elevación entre 0-600 msnm, con rangos de temperatura y precipitación de 24-29 °C y 2000-2500 mm respectivamente, en terrenos preferiblemente planos y sin pedregosidad con pendientes menores al 30%. En el país se utiliza para la elaboración de tarimas, embalajes, contrachapados, vigas laminadas, plywood, también en la construcción civil y en la mueblería, por su gran potencial de uso es una de las principales especies utilizadas para la reforestación comercial (Moya, 2003; Rojas, Arias, Moya, Meza, Murillo y Arguedas, 2004; Calvo-Alvarado, 2009). Por esta razón la reforestación comercial con *G. arborea* ha sido una opción importante para la mitigación de los GEI en el país.

Costa Rica como país comprometido con la estabilización y la reducción de los GEI mediante la adopción del Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el Protocolo de Kyoto, además de su meta de ser país carbono neutral, adopta la norma nacional de carbono neutralidad INTE 12-01-06:2011 mediante el acuerdo MINAET N° 70-2011, la cual gestiona y regula los aspectos referentes a la C-neutralidad que se logra con la fórmula “emisiones-reducciones-compensaciones=cero”.

Una manera de compensar a nivel nacional es mediante la creación de las Unidades de Compensación Costarricenses (UCC), una UCC representa un crédito de carbono y equivale a una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente, la cual según el IPCC (2007) es la concentración de dióxido de carbono que podría causar el mismo grado de cambio de radiación solar que una mezcla determinada de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero. Para la comercialización de las UCC el MINAE crea el Mercado Doméstico de Carbono (MDC) mediante el decreto N° 37926-MINAE. El proceso de compra-venta de unidades de reducción provenientes de un proyecto o actividad estarán reguladas por el MDC.

Según varios autores las plantaciones son una importante actividad para el comercio de créditos de carbono (Salinas y Hernandez, 2008; Basu, 2009) y la apertura del MDC representa un gran potencial para la reforestación. El cálculo del contenido de carbono en las plantaciones forestales es importante para cuantificar la cantidad fijada (Brown, 1997; Jiménez y Landeta, 2009). Esto demuestra que para llevar a cabo la comercialización de los créditos de carbono es importante el monitoreo de los rendimientos de las plantaciones, por ello el objetivo general del presente estudio es: describir el rendimiento del crecimiento

y de la acumulación de biomasa y fijación mensual de carbono en la plantación, con los siguientes objetivos específicos: (1) describir las variables climáticas en el lugar de estudio y el crecimiento de la plantación (2) cuantificar la biomasa el carbono y el CO<sub>2</sub> equivalente total por hectárea (3) determinar la tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa y relacionar la curva de crecimiento de la biomasa con la precipitación.

## Material y métodos

Este estudio forma parte del proyecto de investigación **“Irazú: primeros pasos para desarrollar en Costa Rica capacidades y calidades científicas y tecnológicas para la ejecución de proyectos aeroespaciales”**, el cual en su misión científica establece la medición diaria del crecimiento diamétrico de *G. arborea* con un dispositivo a ser desarrollo por los investigadores (Alvarado, Calvo-Alvarado, Calvo, Rosales, Carvajal, Chaves, Jiménez y Castro, 2014; Rosales, Calvo-Alvarado, Calvo, Carrasquilla, Chaves y Alvarado, 2015; Gómez, Calvo-Alvarado, Calvo, Chaves, Carvajal, Valverde, Salazar, Ramírez, Alvarado y Carrasquilla, 2016). El estudio se estableció para caracterizar el crecimiento de la especie indicada y poder así fijar la sensibilidad requerida por el dispositivo y prever el éxito de la misión científica. Tanto el establecimiento como las mediciones de las parcelas fueron diseñadas y ejecutadas por el equipo de la Misión Científica. Este estudio consiste en un análisis preliminar del comportamiento de los datos y a continuación se describe brevemente la caracterización del sitio y la metodología del estudio.

### Sitio de estudio

El estudio se llevó a cabo durante los meses de marzo y octubre del año 2016, en la finca San Clemente de la Empresas Maderas Cultivadas de Costa Rica S.A., ubicada camino a el poblado Medio Queso del distrito Los Chiles, cantón Los Chiles de la provincia de Alajuela, Costa Rica (figura 1) (10°51'28" N y 84° 40' 37" O). Este cantón se encuentra a una elevación media de 92 msnm y cuenta con una época seca de cuatro meses (Orozco, 2007).

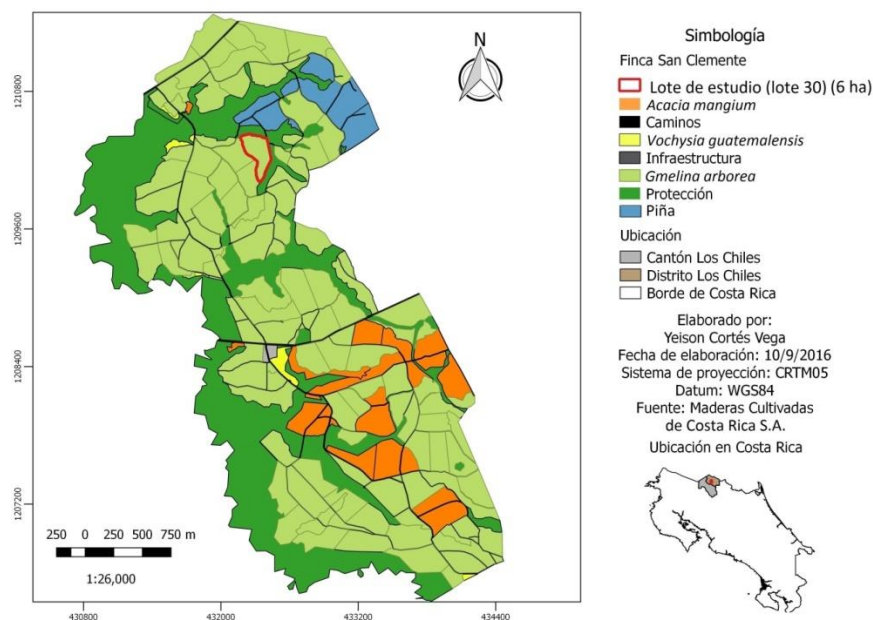


Figura 1. Ubicación del lote de estudio en la finca San Clemente, Los Chiles, Costa Rica.

La finca San Clemente se ubica en la zona de vida Bosque húmedo Tropical (Bh-T), la cual presenta un rango de precipitación entre 1950 y 3000 mm anuales y un rango de temperatura entre los 24 y 25°C, además cuenta con un periodo seco que varía de 0 a 5 meses, esta zona de vida presenta condiciones que favorecen el establecimiento y el desarrollo de diferentes actividades del uso del suelo (Bolaños y Watson, 1993). El área total de la finca es de 984 ha de las cuales aproximadamente 622,5 son dedicadas a la reforestación, con especies como *Gmelina arborea*, *Vochysia guatemalensis* y *Acacia mangium*, el resto son dedicadas a la protección de bosque y el cultivo de piña (Figura 1).

El estudio se realizó en una plantación de *G. arborea*, establecida con semilla de mejor calidad del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), a un espaciamiento de siembra de 4x3 m, el estudio se inició a los ocho meses de establecida la plantación.

El lote posee un área de 6 ha, presenta condiciones aptas de relieve y se encuentra ubicado en suelos de orden ultisol y suborden udults (TEC, 2014). La característica principal de este orden es su color “rojo” y la formación de un horizonte de acumulación de arcillas (figura 2), también presentan un bajo nivel de bases y predominan óxidos de Fe y Al, sin embargo presentan excelentes propiedades físicas (principalmente en estructuración y drenajes

naturales), las cuales pueden deteriorarse sino se regula la intensidad de mecanización. Los problemas en este orden son principalmente nutricionales, la lixiviación de nutrimentos fundamentales como las bases Ca, Mg y K originan grandes problemas de acidez, además presentan una baja fertilidad debido a su poca capacidad de intercambio de cationes efectiva, poseen una baja cantidad de materia orgánica y también problemas de disponibilidad de P y N. Estos problemas dificultan el crecimiento y la producción de las plantas (Bertsch, Mata y Henríquez, 1993; Calvo-Alvarado, Arias, Richter, 2007). Para el manejo de este tipo de suelos diferentes autores recomiendan la aplicación de encalado especialmente con suplementos de Ca y Mg, además, fertilizar con elementos como N, P y K entre otros (Calvo y Camacho, 1992; Bertsch *et al*, 1993; FAO, 2006, Calvo-Alvarado, Arias and Richter, 2007).



Figura 2. Suelos de orden Ultisol y suborden Udults característicos en la plantación en estudio.



### Diseño de muestreo y recolección de datos

Se establecieron tres parcelas rectangulares y permanentes de 500 m<sup>2</sup> (20 x 25 m), las parcelas se ubicaron en el centro de la plantación para evitar el efecto borde en el crecimiento de los árboles. Cada parcela constaba de 40 árboles, sin embargo esa cantidad disminuyó por mortalidad (figura 3).



Figura 3. Diseño de muestreo en el lote de estudio.

Fuente: Proyecto Irazú-PRIAS.

Se midió el diámetro en mm a 1,30 m de altura (DAP), con una cinta métrica y la altura total con la ayuda de una vara telescópica (figura 4), ambas variables se midieron al menos una vez al mes en el año 2016 durante un periodo de ocho meses (marzo-octubre), las mediciones mensuales no se lograron realizar en la misma fecha. Durante cada medición de DAP se ingresaron aquellos árboles que alcanzaban el 1,30 m de altura y se excluyó un árbol por mortalidad.





Figura 4. Medición en campo de la variable altura total.

Además, se recolectaron datos de variables climatológicas como temperatura, humedad relativa y precipitación, estos valores se registraron cada media hora durante los meses de abril y octubre, por medio de una estación meteorológica conformada por un pluviómetro y un sensor de medición de temperatura y humedad relativa, ubicada en el área de muestreo (figura 5).



Figura 5. Estación climática instalada en el lote de estudio.

## Descripción del crecimiento y tasas porcentuales de incremento mensual

Para analizar el crecimiento del DAP y altura total (h) de los árboles se utilizaron las mediciones realizadas cada mes, durante el periodo de estudio. Se calcularon los promedios mensuales para ambas variables para elaborar los diferentes gráficos, el área basal se obtuvo sumando el área basimétrica de todos los árboles, la cual se estima utilizando la fórmula del área del círculo:

$$A = \pi * r^2$$

Donde: A: es el área del círculo (m<sup>2</sup>),  $\pi$ : valor constante y r: radio (m). Posteriormente se utilizó el tamaño de las parcelas para extrapolar el valor obtenido a hectáreas.

El número de árboles por clases diamétricas se obtuvieron extrapolando a hectáreas la cantidad de árboles muestreados, utilizando el tamaño de las parcelas.

Para determinar el incremento de las variables de crecimiento se calcularon las tasas porcentuales de incremento mensual, las cuales muestran el incremento en un mes exacto (30 días), las tasas de incremento mensual se obtuvieron mediante la fórmula de tasa de cambio de la FAO (1995):

$$\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{1}{(t_2-t_1)}} - 1$$

Donde:  $t_1$ : es la primera fecha de evaluación,  $t_2$ : segunda fecha de evaluación,  $A_1$ : variable obtenida en la primera fecha de evaluación,  $A_2$ : variable obtenida en la segunda fecha de evaluación.

La misma fórmula se encarga de ajustar la cantidad de días que transcurrieron entre una y otra medición y mostrar el incremento durante 30 días.

## Cuantificación de biomasa, carbono, CO<sub>2</sub> equivalente

Los cálculos de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> equivalente se realizaron por componentes del árbol arriba y abajo del suelo (fuste, ramas, follaje y raíces), posteriormente se sumó el valor por componente para obtener el total de cada variable.

**Biomasa (Mg ha<sup>-1</sup>).** Para el cálculo de biomasa se utilizaron los datos de crecimiento de los diferentes meses así como de la última medición, todos los cálculos se realizaron en kilogramos por árbol y se convirtieron a megagramos (Mg) por hectárea, utilizando el área total de las parcelas y la relación entre el kilogramo y el megagramo, posteriormente se sumó la biomasa de cada árbol para obtener el total.

El cálculo de la biomasa arriba del suelo (BAS) se realizó utilizando ecuaciones alométricas en función del DAP para tres componentes del árbol: fuste, follaje y ramas (Cuadro 1), esas ecuaciones fueron reportadas por Arias, Calvo-Alvarado, Richter y Dohrenbusch (2011) para la zona sur de Costa Rica y determinadas mediante estudios destructivos. Las ecuaciones para biomasa de fuste y ramas son exclusivas para *G. arborea*, mientras que la ecuación para follaje la determinaron de forma general para las seis especies del estudio. La corteza no se consideró en el presente estudio

Cuadro 1. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la biomasa arriba del suelo en función del DAP (cm).

Componente	Ecuación	R <sup>2</sup>	N
Fuste	$0,075(\text{DAP})^{2,4167}$	0,99	12
Ramas	$0,1001(\text{DAP})^{1,662}$	0,92	12
Follaje	$0,1602(\text{DAP})^{2,1937}$	0,97	24

Fuente: Arias *et al.*, 2011.

El cuadro 1 muestra las ecuaciones de biomasa para Fuste, ramas y follaje, así como los parámetros de las ecuaciones reportados por los autores, los coeficientes de determinación (R<sup>2</sup>) obtenidos en las tres ecuaciones superan el 90%, asimismo muestran el número de árboles (n) utilizados para la determinación de cada una de las ecuaciones.

Cabe destacar que no todos los DAP utilizados para el cálculo de biomasa en el presente estudio se encuentran en el rango recomendado (9,5 – 26,3 cm) por los autores para el uso de las ecuaciones, sin embargo, estas se utilizaron al no encontrar reportes de ecuaciones para cálculos de biomasa en diámetros menores.

La biomasa de las raíces (Br) se estimó multiplicando la biomasa arriba del suelo por un valor de proporción raíz/tallo (root-shoot ratio) para *G.arborea*. Swamy, Kushwaha y Puri

(2004) y Swamy y Puri (2005) reportan valores de esa proporción entre 0,21-0,27, para efectos de este estudio se utilizó el límite inferior para evitar sobrestimar biomasa.

**Carbono (Mg ha<sup>-1</sup>).** Para obtener el valor de carbono almacenado (C) en la biomasa se multiplicó la biomasa por un valor de fracción de carbono (Fc), este valor es el contenido de carbono en la biomasa y según diferentes investigaciones varía dependiendo la especie (Andrade, 1999; Montero y Kanninen, 2002; Alberto y Elvir, 2005).

En el presente estudio se utilizó un Fc igual a 0,5, el cual es considerado como un valor estándar (1 Mg de biomasa es equivalente a 0,5 Mg de carbono) (Brown y Lugo, 1984; Brown y Lugo, 1992; Rügnitz, Chacón y Porro, 2008) y recomendado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático para estudios de almacenamiento de carbono en árboles, además, es utilizado en muchas investigaciones en diferentes países (Dzib, 2003; González, 2008; Jiménez y Landeta, 2009; Bohre, Chaubey y Singhal, 2013).

Detalle de la ecuación para el cálculo del carbono total:

$$C: B * Fc$$

Donde: C: carbono (Mg ha<sup>-1</sup>), B: Biomasa (Mg ha<sup>-1</sup>), Fc: 0,5, fracción de carbono.

**CO<sub>2</sub> equivalente (Mg ha<sup>-1</sup>).** Para este cálculo se utilizó un factor de conversión (Cf) para transformar el carbono (Mg ha<sup>-1</sup>) a CO<sub>2</sub> equivalente (Mg ha<sup>-1</sup>). El valor del factor utilizado fue 3,67 y es el resultado del cociente entre el peso de la molécula del dióxido de carbono (44) y el peso del átomo de carbono (12) (1 Mg de carbono equivale a 3,67 Mg de CO<sub>2</sub>) (Montero, Ruiz y Muñoz, 2005; Rügnitz, Chacón y Porro, 2009; Bohre, Chaubey y Singhal, 2013).

Detalle de la ecuación para el cálculo del CO<sub>2</sub> equivalente:

$$CO_2e = C * Cf$$

Donde: CO<sub>2</sub>e: Dióxido de Carbono equivalente (Mg ha<sup>-1</sup>), C: Carbono (Mg ha<sup>-1</sup>), Cf: 3,67, factor de conversión de C a CO<sub>2</sub>-e.

## **Tasas de incremento mensual de biomasa y relación precipitación y biomasa**

Para determinar la tasa de incremento mensual se utilizaron los datos de biomasa obtenidos cada mes, para calcular las tasas se usó la fórmula de tasa de cambio de la FAO (1995):

$$\left(\frac{A_2}{A_1}\right)^{\frac{1}{(t_2-t_1)}} - 1$$

Donde:  $t_1$ : es la primera fecha de evaluación,  $t_2$ : segunda fecha de evaluación,  $A_1$ : variable obtenida en la primera fecha de evaluación,  $A_2$ : variable obtenida en la segunda fecha de evaluación.

Para analizar la relación entre la precipitación y la biomasa se utilizó el acumulado por mes de ambas variables, los meses de marzo y abril no se incluyeron en el gráfico ya que la estación climatológica se colocó en a finales de abril por lo que no registró una precipitación representativa durante ese mes.

## Resultados

### Variables climáticas y crecimiento

En la figura 6 se muestra el comportamiento mensual promedio de la temperatura, humedad relativa y precipitación, durante el periodo de estudio. El promedio de la precipitación, la temperatura y la humedad relativa del mes de abril no se incluyeron, ya que los valores obtenidos no fueron representativos, al registrarse solo los últimos ocho días del mes.

Los valores máximos de temperatura se registraron en los meses de abril y mayo (29 y 27 °C respectivamente) y el valor mínimo durante el mes de julio (25 °C). La humedad relativa presentó cómo se anticipa un comportamiento inverso a la temperatura, ya que registró los valores mínimos durante marzo y abril (72 y 86% respectivamente) y uno de los máximos valores durante el mes de julio, ambas variables presentan un comportamiento muy constante durante el periodo de estudio. La precipitación se comportó de forma variable, mayo reportó 268,1 mm, posteriormente se presentó un incremento, junio y julio registraron los valores máximos de precipitación con 346,0 y 340,6 mm respectivamente, en los últimos tres meses del estudio la precipitación disminuyó y se comportó constantemente.

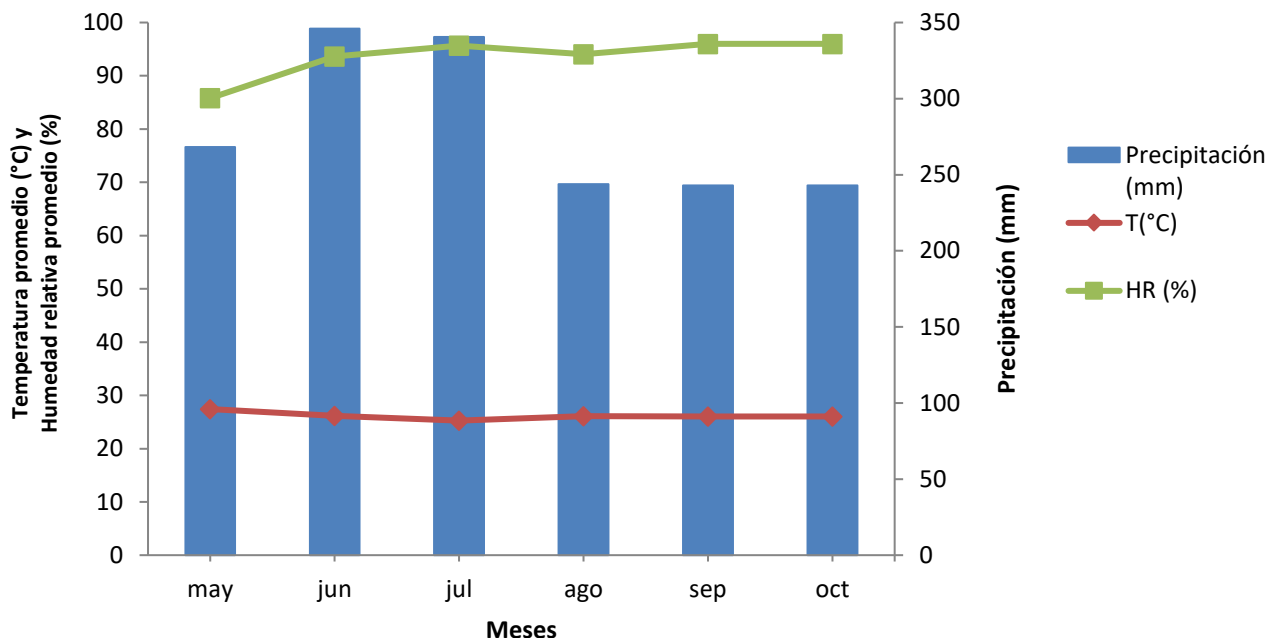


Figura 6. Climograma mensual durante el periodo de estudio, los Chiles, Costa Rica.

El diámetro y la altura promedio incrementaron en un 161% y 122%, en un periodo de 8 y 7 meses respectivamente. Las curvas de crecimiento de ambas variables poseen un comportamiento similar en los últimos cinco meses de estudio (junio-octubre), el promedio de la altura total para el mes de marzo no se logró determinar ya que en esa campaña de recolecta de datos en campo no se llevó a cabo la medición de la variable, igualmente sucedió con el mes de mayo, sin embargo este promedio se proyectó utilizando el método lineal (figura 7).

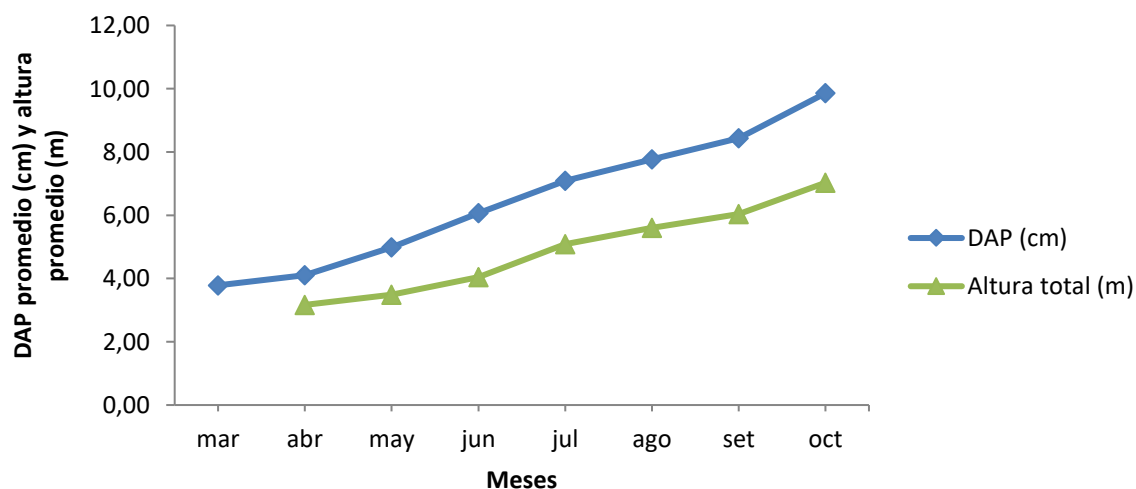


Figura 7. Diámetro y altura promedio para cada medición.

El cuadro 2 muestra las tasas porcentuales de incremento mensual obtenidas para el DAP y la altura total, entre los meses de estudio. La tasa con mayor incremento mensual de DAP se presenta entre los meses de mayo y junio (23,38%), mientras que el valor más bajo se presenta al inicio del estudio, entre marzo y abril (6,95%). Para la altura total la tasa más alta se presentó entre junio y julio (18,18%) y la tasa más baja entre setiembre y octubre (10,65%), la tasa de incremento entre marzo y abril no se pudo determinar al no contar con datos de altura para el mes de marzo. La tasa de incremento promedio es similar en ambas variables.

Es importante aclarar que los incrementos mensuales fueron ajustados a 30 días, por ello los valores del último incremento entre setiembre y octubre no coinciden con los valores promedio de las variables obtenidos a partir de la última medición en campo.

Cuadro 2. Tasas porcentuales de incremento mensual e incrementos mensuales del DAP y la altura total.

Variable	Incremento	mar-abr	abr-may	may-jun	jun-jul	jul-ago	ago-set	set-oct	Promedio
DAP	%	6.95	18.17	23.38	18.28	12.63	13.02	11.00	14.81
	cm	4.05	4.85	6.15	7.17	7.99	8.78	9.36	
Altura total	%	-	6.89	6.89	18.18	13.42	12.02	10.65	11.34
	m	-	3.38	3.73	4.78	5.77	6.27	6.68	

La plantación de año y tres meses de edad presentó un DAP y una altura promedio de 9,86 cm y 7,03 m respectivamente (figura 3), además posee un área basal (G) de 6,14 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>.

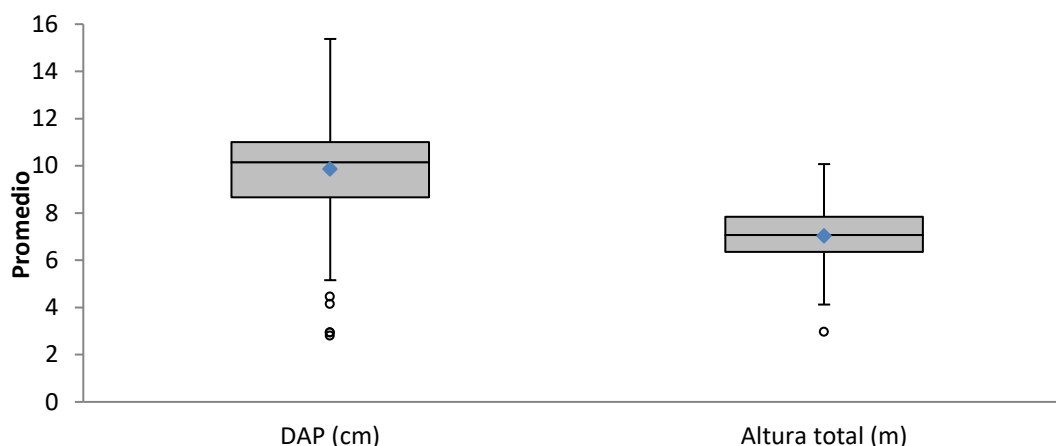


Figura 8. Intervalos de confianza y valores promedio del DAP y la altura total.

La figura 8 muestra los límites de confianza determinados para ambas variables, el DAP presenta límites de confianza 5,16 - 15,37 cm, con cuatro valores atípicos por debajo del límite inferior y un coeficiente de variación del 24%. La altura total solo presenta un valor atípico por debajo del límite inferior, los límites de confianza de esta variable son 4,12 - 10,07 m y el coeficiente de variación es de 14%. Ninguna de las variables presentó valores atípicos por encima de los límites superiores.

Cuadro 3. Distribución del número de árboles por clases diamétricas (cm).

Clases diamétricas	1-3	3-5	5-7	7-9	9-11	11-13	13-15	>15	Total
N° de árboles ha <sup>-1</sup>	13	13	73	107	360	133	53	7	760

El 79% de los individuos se ubicaron en las clases diamétricas entre los 7 y 13 cm, los individuos presentes en las clases diamétricas menores (1-3 y 3-5 cm) solo representan el 3,5% y correspondieron a individuos suprimidos que posiblemente se eliminen en el primer raleo que se realice.

## Biomasa, carbono, CO<sub>2</sub> equivalente

La figura 9 muestra el total acumulado de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e por mes, el estudio se inició a los 8 meses de establecida la plantación, la cual ya acumulaba 3,22, 1,61 y 5,92 Mg



ha<sup>-1</sup> de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e respectivamente, cuatro meses después (al año de establecida) los valores fueron 12,14, 6,07 y 22,28 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, la biomasa arriba del suelo aportó 10,04 Mg ha<sup>-1</sup>, las restantes 2,11 Mg ha<sup>-1</sup> corresponden a la biomasa de raíces. El comportamiento del incremento acumulado de carbono y el CO<sub>2</sub>-e es similar al de la biomasa, por estar en función directa de esta variable.

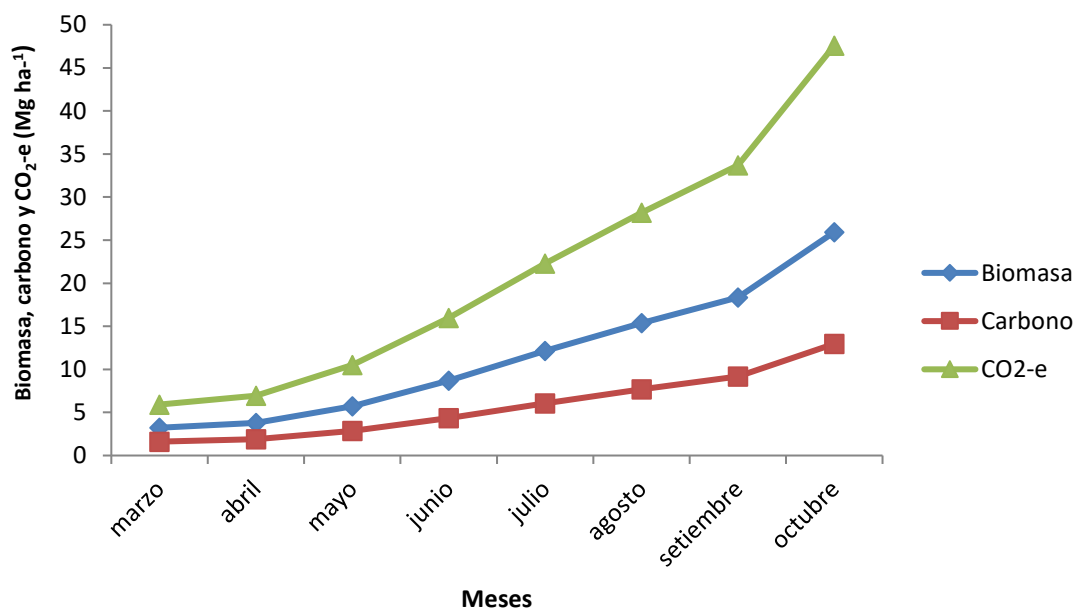


Figura 9. Valores acumulados de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e en cada medición mensual.

Durante los ocho meses de estudio la biomasa total incrementó 22,71 Mg ha<sup>-1</sup>. El total de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e acumulado en la plantación de año y tres meses de edad fue 25, 94, 12,97 y 47,59 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente. La figura 10 muestra la distribución de las tres variables por componentes del árbol (Fuste > Raíces > Ramas > Follaje) la distribución es la misma ya que el carbono y el CO<sub>2</sub>-e son múltiplos de la biomasa.

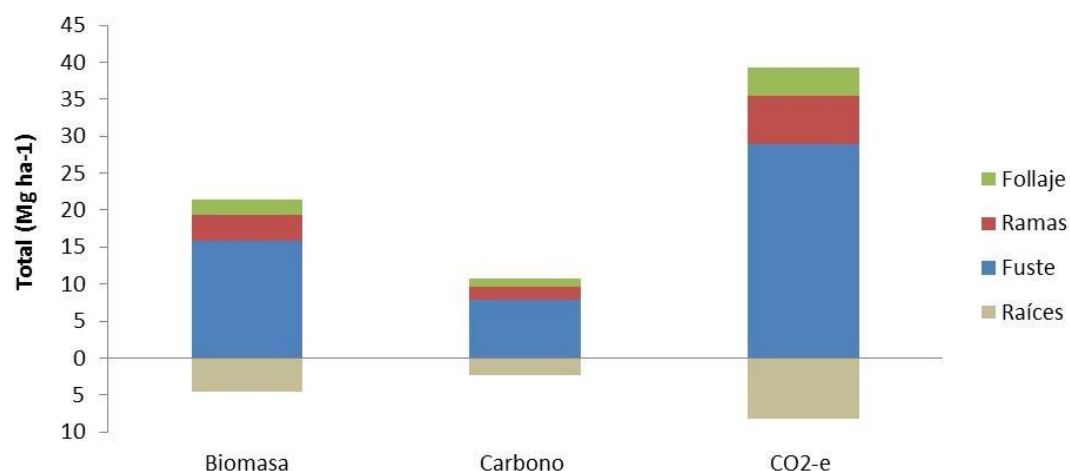


Figura 10. Distribución del total de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e por componentes del árbol. El componente que más biomasa aporta es el fuste con 15,78 Mg ha<sup>-1</sup> (61%), por consiguiente también es el componente que más carbono y CO<sub>2</sub>-e almacena (7,89 y 28,96 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente), las raíces aportan un total de 4,50 Mg ha<sup>-1</sup> (17%) y representan el segundo lugar en aporte de biomasa por delante de las ramas y el follaje que aportan 3,52 (14%) y 2,13 Mg ha<sup>-1</sup> (8%) respectivamente, este último componente es el que menos biomasa presenta (cuadro 4).

Cuadro 4. Biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e (Mg ha<sup>-1</sup>) acumulado en una plantación de *G.arborea* de un año y tres meses de edad.

Variables	Componentes del árbol					Total arriba del suelo
	Fuste	Ramas	Follaje	Raíces	Total	
Biomasa	15,78	3.52	2.13	4.50	25,94	21,43
Carbono	7,89	1.76	1.06	2.25	12,97	10,72
CO <sub>2</sub> -e	28,96	6.47	3.90	8.26	47,59	39,33

La biomasa arriba del suelo representa el 83% (21,43 Mg ha<sup>-1</sup>) de la biomasa total (BAS + biomasa de raíces). La BAS presentó la siguiente distribución por componentes del árbol: fuste 74%, ramas 16% y follaje 10%), en el cuadro 4 se muestran los valores de carbono y CO<sub>2</sub>-e obtenidos para los componentes arriba del suelo.

## Tasas porcentuales de incremento m

### ensual de biomasa

El cuadro 5 muestra las tasas porcentuales de incremento mensual de la biomasa total, durante el periodo de estudio, el carbono y CO<sub>2</sub>-e presentan las mismas tasas de incremento.

Cuadro 5. Tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa total.

Variable	Incremento	mar-abr	abr-may	may-jun	jun-jul	jul-ago	ago-set	set-oct	Promedio
Biomasa total	%	14.34	42.65	56.35	43.02	36.01	30.54	25.88	35.54
	Mg ha <sup>-1</sup>	3.69	5.40	8.96	12.44	16.52	20.07	23.12	

Las tasas máximas de incremento mensual se registraron entre abril y julio, el periodo entre mayo y junio fue en el que los árboles presentaron un mayor incremento mensual en la cantidad de biomasa (56,35%), mientras que la tasa más baja se presentó al inicio del estudio entre los meses de marzo y abril (14,34%), en promedio la tasa de incremento mensual fue del 35,62%.

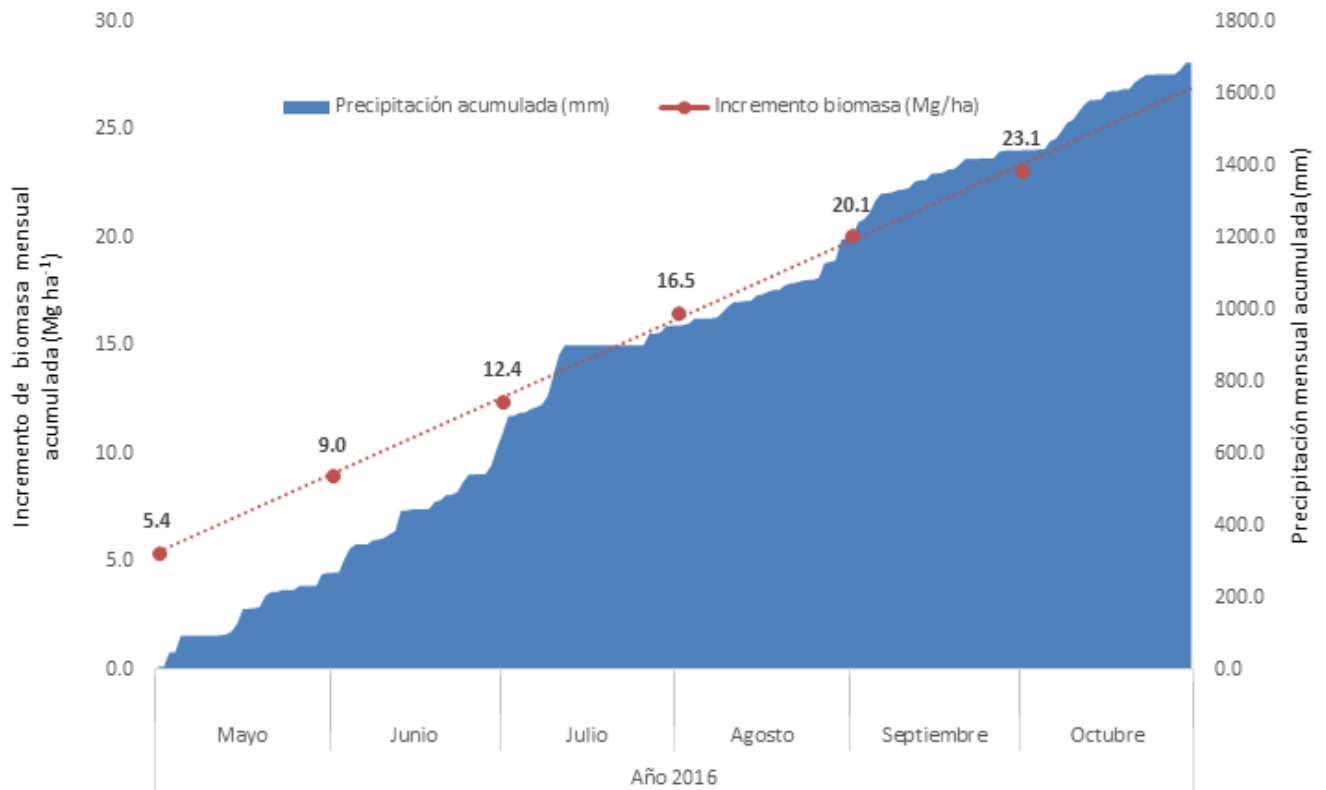


Figura 11. Relación entre la precipitación mensual acumulada y el crecimiento mensual de la biomasa.

La curva de incremento mensual de biomasa obtenida mediante las tasas porcentuales de incremento mensual presentó un comportamiento similar a la precipitación diaria acumulada para cada mes, ambas variables mostraron un comportamiento creciente, la biomasa aumenta conforme aumenta la acumulación de precipitación diaria durante los diferentes meses.

## Discusión

### Crecimiento

Las tasas reportadas para la altura total en los periodos de abril-mayo y mayo-junio son constantes ya que se calcularon con los promedios de altura de los meses de abril y junio y el tiempo transcurrido entre ambos meses, debido a la ausencia del promedio para el mes

de mayo, la tasa de incremento entre marzo y abril fue imposible calcularla ya que se necesitan al menos dos promedios.

La tasa mínima de incremento mensual (marzo-abril) se puede relacionar con los meses de menor precipitación en la zona (marzo y abril), además, la tasa de incremento entre abril y mayo aumenta notablemente y se puede atribuir al aumento en la precipitación, al aumentar las lluvias los árboles se liberan del estrés hídrico al que estaban sometidos y aumentan su productividad (Moreno, 2009; MAG, 2010). Asimismo las tasas máximas de incremento mensual del DAP (mayo-junio y junio-julio) coinciden con los meses de mayor precipitación en el lugar, mayo, junio y julio, los cuales registraron una precipitación mensual de 348,4, 449,6 y 442,6 mm respectivamente. La variable altura presenta un comportamiento similar al registrar la tasa de incremento máxima durante los meses de mayor precipitación.

Flores, Medina, Osornio y López (2008) afirman que el agua influye en el crecimiento y la productividad de las plantas, lo cual justifica el comportamiento de las tasas de incremento obtenidas. Existen otras variables como la luz y la disponibilidad de nutrientes, las cuales también influyen en el crecimiento de los árboles (Bellote y Farreira, 1995; Wolpert, 2009), sin embargo no se contemplaron en el presente estudio.

### **Biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e**

Los resultados obtenidos muestran la biomasa, el carbono fijado y el CO<sub>2</sub>-e en una plantación de *G. arborea* de un año y tres meses de establecida, en condiciones anteriormente descritas. Los estudios de biomasa en plantaciones de *G. arborea* de corta edad son escasos y a nivel mensual casi no existen, la mayoría de reportes se realizaron en plantaciones de edad avanzada. Ante la limitante de esos reportes son pocos los valores de biomasa que sirven como parámetro de comparación con los datos obtenidos.

Swamy, Kushwaha y Puri (2004) encontraron un promedio de 3,94 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa, en plantaciones de un año de edad, ubicadas en tres diferentes sitios en la India, valor muy inferior comparado con el dato obtenido al año de establecida la plantación (10,04 Mg ha<sup>-1</sup>), la diferencia se puede justificar al comparar los diámetros promedio de ambos estudios, los autores presentan un DAP promedio de 3,24 cm, muy por debajo del DAP promedio al año de edad, en el presente estudio (6,91 cm).

En Costa Rica son pocos los estudios de biomasa en plantaciones de corta edad de *G. arborea*. Tenorio, Moya, Arias y Briceño (2016) reportaron valores entre 4,20 - 22,60 Mg ha<sup>-1</sup> de BAS en plantaciones de un año de edad, establecidas en tres sitios diferentes. Uno de los tres sitios de estudio se ubicó en el cantón de Upala donde obtuvieron 22,60 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa arriba del suelo, valor superior al obtenido en la plantación al año de edad (10,04 Mg ha<sup>-1</sup>) pero similar a las 21,43 Mg ha<sup>-1</sup> cuantificadas al año y tres meses de edad. Aunque existen semejanzas en los valores es importante aclarar que la densidad de las plantaciones y el método de cuantificación de biomasa utilizado en ambos casos fueron distintos.

Según De Camino, Alfaro y Sage (2002) y Tenorio *et al* (2016) las variaciones encontradas entre los valores de biomasa obtenidos y reportados pueden atribuirse a diversas razones como la calidad del sitio, la densidad de siembra y el manejo silvicultural aplicado a las plantaciones. Agus, Karyanto, Hardiwinoto, Na'iem, Kita, Haibara & Toda (2001) en un estudio realizado en Indonesia determinaron que el crecimiento en biomasa de la especie depende en gran cantidad de la calidad del sitio donde se desarrolle, lo que podría explicar el alto valor de biomasa obtenido en un plantación de apenas un año y tres meses de edad, el sitio donde se ubica la plantación presenta condiciones muy aptas para su crecimiento (buena pendiente sin riesgo de inundación, , además de una excelente preparación de sitio antes de la siembra, que incluyó mecanización del terreno, fertilización y encalado. La alta calidad de la semilla utilizada también favorece el buen crecimiento de los árboles.

La distribución porcentual de la biomasa arriba del suelo por componentes del árbol no difiere mucho de lo reportado en la literatura. Onyekwelu (2004) reportó la siguiente distribución en plantaciones de diferentes edades (5-21 años) en Nigeria: fuste 84%, ramas 13% y follaje 3%. El porcentaje de biomasa de ramas obtenido en el presente estudio (16%) es similar al de la literatura, sin embargo, el valor porcentual de biomasa en el follaje (10%) fue mayor al reportado por Onyekwelu y el valor de biomasa en fuste (74%) menor. La variación en los valores pudo deberse a la diferencia en edad en las plantaciones, Arias *et al.* (2011) mencionan que el porcentaje de biomasa de follaje tiende a disminuir y el de fuste a aumentar conforme incrementan las dimensiones del árbol.

Los estudios de almacenamiento de carbono en plantaciones de *G.arborea* de un año de edad son escasos, sin embargo, existen estudios como el de Agus *et al.* (2001) (plantación de tres años de edad de *G.arborea* en Indonesia) que permiten visualizar el comportamiento

de los valores de carbono en plantaciones de corta edad, los autores reportaron 27 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en la BAS. En el presente estudio se obtuvieron 10,72 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono en la BAS de una plantación de año y tres meses de edad, de mantenerse la tendencia con la que incrementó la fijación de carbono, la plantación en estudio a los tres años de edad podría obtener un valor similar al reportado por los autores, sin embargo es una simple proyección que refleja la importancia de estudios como el realizado.

El valor obtenido de carbono total (12,97 Mg ha<sup>-1</sup>) en la plantación supera el acumulado en otras coberturas forestales como bosques secundarios. En el Caribe de Costa Rica se reportaron valores de carbono de 12,40 y 12,80 Mg ha<sup>-1</sup> en bosques secundarios de cinco años de edad, asimismo en la zona de San Carlos de Nicaragua se han encontrado valores de carbono de 7,30 y 10,94 Mg ha<sup>-1</sup> en bosques secundarios de seis y siete años respectivamente (Ferreira, 2001; Fonseca, Alice, Montero, Toruño y Leblanc, 2008).

Además, el valor de carbono registrado en la plantación también supera el acumulado en otros usos del suelo, como sistemas agroforestales (SAF), Avila, Jiménez, Beer, Gómez y Ibrahim (2001) obtuvieron valores de 7,7 Mg ha<sup>-1</sup> en un SAF de café y eucalipto (*Eucalyptus deglupta*) de seis años de edad y 8,9 Mg ha<sup>-1</sup> en un sistema silvopastoril de bachiaría y mangium (*Acacia mangium*), ubicados en Grecia de Alajuela y en Pococí de Limón respectivamente.

Las plantaciones forestales proveen muchas ventajas como el aumento de la cobertura, y la generación de productos forestales (Pattanayak, Wunder y Ferraro, 2010; Omeja, Chapman, Obua, Lwanga, Jacob, Wanyama, Mugenyi, 2011), además, ante la diversidad de coberturas, las plantaciones, principalmente las de rápido crecimiento, representan una fuerte opción para almacenar carbono y compensar la emisión de GEIS especialmente del CO<sub>2</sub>. Con la apertura del mercado doméstico de carbono la reforestación generará ingresos económicos mediante la venta de bonos de carbono en toneladas de CO<sub>2</sub>-e, por ello es importante incentivar la reforestación de especies forestales.

### **Tasas porcentuales de incremento mensual de biomasa**

Las tasas se calcularon con el objetivo de determinar el incremento de biomasa en un mes exacto (30 días), sin embargo, estas no son calculadas para un mes natural (de inicio a final de mes) como si lo es la precipitación mensual, que se obtuvo con la sumatoria de eventos de principio a final de mes, las tasas involucraron días de los meses correspondientes. La

relación entre la precipitación y el incremento de la biomasa es clara, además, sería muy interesante conocer el comportamiento de la curva de incremento de la biomasa durante la época seca donde se presentan meses con poca precipitación.

Cabe destacar que otras variables como la intercepción de la precipitación y la evapotranspiración, influyen en la cantidad de agua que absorben las plántulas, el agua que cae sobre los árboles y se evapora ahí mismo no llega al suelo por lo que no es absorbida, así como el agua que se pierde durante la apertura de los estomas a través del proceso de transpiración pueden influir en la variación del comportamiento de las curvas de incremento mensual de biomasa y de precipitación mensual, ya que no toda la lluvia que cae es utilizada en los procesos de crecimiento (Guariguata y Kattan, 2002), por ello sería importante realizar balances hídricos en los cuales se logrará obtener la cantidad de agua retenida en el suelo, sin embargo en el presente estudio aún no se cuenta con los datos climáticos de un año hidrológico para poder realizar dicho balance.

Existe una clara influencia de la precipitación con el crecimiento, como ya se especificó en el incremento mensual de DAP. Lugo, Brown & Chapman (1988) afirman que la biomasa en las plantaciones tropicales se ve influenciada por la disponibilidad de agua, en general la biomasa tiende a disminuir ante la baja faltante del recurso, sin embargo, el autor menciona, que en algunas especies esta influencia se expresa en plantaciones de edad avanzada, donde la influencia climática predomina. Es importante continuar con estudios que involucren el comportamiento de la biomasa con la precipitación, principalmente en los meses secos, ante el estrés hídrico y ante una especie caducifolia.

## Conclusiones

El promedio de la temperatura, la precipitación y la humedad relativa durante los meses de estudio fueron 26,17 °C, 280,74 mm y 93,54% respectivamente. La plantación presentó un DAP y una altura promedio de 9,86 cm y 7,03 m respectivamente, con promedios de tasas de incremento mensual del 14,81% y 11,64% para el DAP la altura total respectivamente.

Los valores obtenidos de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e fueron 25,94, 12,97 y 47,59 Mg ha<sup>-1</sup> respectivamente, además, se determinó que las plantaciones representan una opción importante para la comercialización de bonos de carbono.



Se determinó un promedio para la tasa porcentual de incremento mensual de biomasa del 35,62%, además, se logró determinar que el crecimiento de la biomasa se asocia al aumento de la lluvia y que la misma se mantiene constante si la humedad del suelo es constante.

## Recomendaciones

Continuar con el registro de las variables climáticas hasta completar el año hidrológico para llevar acabo relaciones con el aumento de biomasa y la captura de carbono empleando balance hídricos mensuales (Calvo 1986, Moya y Calvo-Alvarado, 2012) y diarios.

Calcular las tasas de incremento mensual de biomasa, durante los meses de época seca, que no fueron incluidos en el presente estudio (diciembre-febrero), con el fin de conocer el comportamiento de la biomasa durante el periodo seco.

Realizar estudios destructivos para calcular la biomasa en la plantación y generar modelos alométricos de biomasa y carbono para plantaciones de *G.arborea* de corta edad ( $\leq 3$  años).

Continuar en los próximos años con los estudios de cuantificación de biomasa en la plantación, con el fin de reportar las tasas de incremento anual y determinar la acumulación de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>-e al turno de corta de la plantación.

## Referencias

- Agus, C., Karyanto, O., Hardiwinoto, S., Na'iem, M., Kita, S., Haibara, K., & Toda, H. (2001). Biomass productivity and carbon stock in short rotation plantation of *Gmelina arborea* Roxb. in tropical forest. IJAS, 1, 11-16.
- Alberto, D., & Elvir, J. (2008). Acumulación y fijación de carbono en biomasa aérea de "*Pinus oocarpa*" en bosques naturales en Honduras. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 17(1), 67-78.
- Andrade, C. H. J. (1999). Dinámica productiva de sistemas silvopastoriles con *Acacia mangium* y *Eucalyptus deglupta* en el trópico húmedo. Tesis Mag. Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 70 p.
- Arias, D., Calvo-Alvarado, J., Richter, B., & Dohrenbusch, A. (2011). Productivity, aboveground biomass, nutrient uptake and carbon content in fast-growing tree plantations of native and introduced species in the Southern Region of Costa Rica. *Biomass and bioenergy*, 35(5), 1779-1788.
- Avila, G., Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M., & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, fijación de carbono y valoración de servicios ambientales en sistemas agroforestales de Costa Rica. *Agroforestería en Las Américas*, 8(30), 32-35.
- Basu, P. (2009). Forestry: A green investment. *Nature*, 457(7226), 144-146.
- Bellote, A., Ferreira, C. (1995). Nutrientes minerales y crecimiento de árboles abonados de *Eucalyptus grandis* en el Estado de São Paulo. *Bosque (Valdivia)*, 16(1), 69-75.
- Bertsch, F., Mata, R. & Henríquez, C. (1993). Características de los Principales ordenes de suelos presentes en Costa Rica. Universidad de Costa Rica.



- Bohre, P., Chaubey, O., & Singhal, P. (2013). Biomass accumulation and carbon sequestration in *Tectona grandis* Linn. f. and *Gmelina arborea* Roxb. *International Journal of Bio-Science & Bio-Technology*, 5(3), 153-174.
- Bolaños, R., Watson, V., & Tosi, J. (1993). Mapa ecológico de Costa Rica según el sistema de clasificación de zonas de vida del mundo. Centro Científico Tropical-ICE, San José, Costa Rica. Escala, 1(200.000).
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *science*, 320(5882), 1444-1449.
- Brown, S. (1997). Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer (Vol. 134). Food & Agriculture Org.
- Brown, S., & Lugo, A. E. (1984). Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes. *Science*, 223(4642), 1290-1293.
- Brown, S., Lugo, A. (1992). Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia (Venezuela)* v. 17 (1) p. 8-18.
- Calvo, J. 1986. An evaluation of the Thornthwaite water balance technique for predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal* 31: 51-60 pp
- Calvo-Alvarado, J. y Camacho, D. 1992. Algunos factores relacionados con el crecimiento de *Gmelina arborea* Roxb. en la zona norte de Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol.11: 15-33 pp.
- Calvo-Alvarado J.C., Arias D. and D. Richter. 2007. Early growth performance of native and introduced fast growing tree species in wet to sub-humid climates of the Southern region of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*. 242: 227–235.
- Calvo-Alvarado, J. 2009. Bosque, cobertura y recursos forestales 2008. Informe Estado de la Nación. Capítulo Armonía con la Naturaleza. XV Informe Estado de la Nación. San José, Costa Rica. 26 p.
- Alvarado, C., Calvo-Alvarado, J, Calvo, A., Rosales, L., Carvajal, J., Chaves, A. y Castro, R. 2014. Advances for the mision of the first central american satellite: The role of the government, industry and academia of Costa Rica. 65th International



- Astronautical Congress. Toronto 29th-3th Oct 2014. International Astronautical Federation. Toronto, Canada.
- De Camino, R., Sage, L., Alfaro, M., & Varmola, M. (2002). Teak (*Tectona grandis*) in Central America.
- Dzib B. (2003). Manejo, secuestro de carbono e ingresos de tres especies forestales de sombra en cafetales de tres regiones contrastantes de Costa Rica.
- Echeverri, C. (2006). Estimación de la emisión de gases de efecto invernadero en el municipio de Montería (Córdoba, Colombia). *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 5(9), 85-96.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). 2006. Base Referencial mundial del recurso suelo. 2 ed. 117 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación). (1995). Forest resources assessment 1990. Global Synthesis. FAO, Rome.
- Ferreira, C. M. (2001). Almacenamiento de carbono en bosques secundarios en el municipio de San Carlos, Nicaragua. CATIE.
- Flores, W., Estrada, H., Osornio, J., & Pinzón, L. (2012). Efecto del estrés hídrico sobre el crecimiento y eficiencia del uso del agua en plántulas de tres especies arbóreas caducifolias. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 343-353.
- Foley, J. A., Costa, M. H., Delire, C., Ramankutty, N., & Snyder, P. (2003). Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 1(1), 38-44.
- Fonseca, W., Alice, F., Montero, J., Toruño, H., & Leblanc, H. (2008). Acumulación de biomasa y carbono en bosques secundarios y plantaciones forestales de *Vochysia guatemalensis* e *Hieronyma alchorneoides* en el Caribe de Costa Rica.
- Fonseca, W., Navarro, G., Alice, F., & Rey-Benayas, J. M. (2012). Impacto económico de los pagos por carbono y servicios ambientales en las inversiones forestales en la región Caribe de Costa Rica. *Revista Ecosistemas*, 21(1-2).



- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33-38.
- González, M. (2008). Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural de *Pinus masiminoi* HE Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz, y *Quercus* sp. en el norte del estado de Chiapas, México.
- Gómez, M., Calvo-Alvarado, J., Calvo, A., Chaves, A., Carvajal, J., Valverde, A., Ramirez, J., Alvarado, C., Carrasquilla, A. 2016. Irazú: CubeSat Mission Architecture and .Development. 67th International Astronautical Congress (IAC), 26-30 September 2016. Guadalajara, Mexico.
- Guariguata, M., & Kattan, G. (2002). *Ecología y conservación de bosques neotropicales*. Cartago, C.R: Libro Universitario Regional.
- IPCC (Intergovernmental Panel Climatic Change). (2007). Climate change 2017: The physical science basis. Summary for Policymakers. París, Francia. s.e. p 2.
- Jiménez, E., & Landeta, A. (2009). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperina–ESPOL.
- Lugo, A. E., Brown, S., & Chapman, J. (1988). An analytical review of production rates and stemwood biomass of tropical forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 23(2-3), 179-200.
- MAG (Ministerio de Agricultura y Ganadería). (2010). “Caracterización biofísica de las zonas definidas para la Implementación de las opciones de cosecha de agua”.
- Montero, G., Ruiz, R., & Muñoz, M. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.
- Montero, M. M.; Kanninen, M. 2002. Biomasa y carbono en plantaciones de *Terminalia amazonia* en la zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*. Vol. 39-40, p. 50-55.
- Moreno, L. (2009). Respuesta de las plantas al estrés por déficit hídrico. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 27(2), 179-191.



- Moya, R. (2003). La madera de melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. *World*.
- Moya, R and J. Calvo-Alvarado. 2012. Variation of wood color parameters of *Tectona grandis* and its relationship with physical and chemical soil properties. *Annals in Forest Science*. 69(8):947-959.
- Omeja, P., Chapman, C., Obua, J., Lwanga, J., Jacob, A., Wanyama, F., & Mugenyi, R. (2011). Intensive tree planting facilitates tropical forest biodiversity and biomass accumulation in Kibale National Park, Uganda. *Forest Ecology and Management*, 261(3), 703-709.
- Onyekwelu, J. C. (2004). Above-ground biomass production and biomass equations for even-aged *Gmelina arborea* (ROXB) plantations in south-western Nigeria. *Biomass and Bioenergy*, 26(1), 39-46.
- Orozco, E. (2007). Zonificación climática de Costa Rica para la Gestión de Infraestructura Vial. Costa Rica: Universidad de Costa Rica.
- Pattanayak, S., Wunder, S. & Ferraro, P. (2010). Show me the money: do payments supply environmental services in developing countries? *Rev. Environ. Econ. Policy*, 4: 254-274.
- Rojas, F., Arias, D., Moya, R., Meza, A., Murillo, O., & Arguedas, M. (2004). Manual para productores de Melina (*Gmelina arborea*) en Costa Rica. Cartago, Costa Rica.
- Rugnitz, M. T., Chacón, M. L., & Porro, R. (2008). Guía para la determinación de carbono en pequeñas propiedades rurales. Belem, Brasil, IA/ICRAF.
- Rosales, L., Calvo-Alvarado, J; Calvo, A., Carrasquilla, A., Chaves, A & Alvarado, C. 2015. Advances for the first Central America Satellite: Providing solutions to the challenges of environmental monitoring in tropical developing countries. In: *Proceedings of the 66th International Astronautical Congress*. International Astronautical Federation. Jerusalén, Israel.
- Salinas, Z., & Hernández, P. (2008). Guía para el diseño de proyectos MDL forestales y de bioenergía. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE.



- SINAC (Sistema Nacional de Áreas de Conservación). 2013. Mapa de cobertura. [http://www.sirefor.go.cr/wpcontent/uploads/2014/01/Mapa\\_Tipos\\_Bosque\\_INF2013.jpg](http://www.sirefor.go.cr/wpcontent/uploads/2014/01/Mapa_Tipos_Bosque_INF2013.jpg)
- SIREFOR (Sistema de Información de Recursos Forestales). (2013). [http://www.sirefor.go.cr/?page\\_id=836](http://www.sirefor.go.cr/?page_id=836).
- Swamy, S. L., & Puri, S. (2005). Biomass production and C-sequestration of *Gmelina arborea* in plantation and agroforestry system in India. *Agroforestry systems*, 64(3), 181-195.
- Swamy, S. L., Kushwaha, S. K., & Puri, S. (2004). Tree growth, biomass, allometry and nutrient distribution in *Gmelina arborea* stands grown in red lateritic soils of Central India. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 305-317.
- TEC (Tecnológico de Costa Rica). (2014). Atlas Digital de Costa Rica 2014. Cartago, Costa Rica.
- Tenorio, C., Moya, R., Arias, D. & Briceño, E. (2016). Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica. *Industrial Crops and Products*, 82, 63-73.
- Wolpert, L. (2009). Principios del desarrollo. Madrid, España: Médica Panamericana.